



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

TEVLiS: Bewertung der Potenziale der Aufbereitung von verwertbaren Li- Salzverbindungen von Glimmerkonzentraten; TP2: Erzlabor

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil I: Kurzbericht

Ministerium:	Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt
Fördermaßnahme:	Innovation & Strukturwandel
Förderbereich:	WIR! - Wandel durch Innovation in der Region
Projektbündnis:	rECOMine
Förderkennzeichen:	03WIR1912E

Kai Bachmann

Dirk Sandmann

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt unter dem Förderkennzeichen 03WIR1912E gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

1. Aufgabenstellung

Die Firma Erzlabor war im Forschungsvorhaben TEVLIS an zwei von fünf Haupt-Arbeitspaketen (AP1 und AP3) beteiligt. AP1 (mit den Projektpartnern Beak, TUBAF) umfasste die notwendigen Grundlagen für die Durchführung der technischen Arbeiten auf der Spülhalde (Tailing) IAA Bielatal. Die Aufgabenstellung von Erzlabor dazu war die mineralogische Ausgangs-Charakterisierung des Haldenmaterials (AP 130). AP3 (mit dem Projektpartner UVR-FIA) umfasste die Aufbereitungsversuche am gewonnenen Haldenmaterial und die versuchsbegleitenden analytischen Arbeiten dazu (Schwerpunkt des Erzlabor-Anteils am Vorhaben). Im Rahmen der Arbeitspakete 320, 321 und 340 wurden Röntgenfluoreszenzanalysen (XRF), Röntgendiffraktometrie-Analysen (XRD) und Mineral Liberation Analysis (MLA) an Produkten der Versuchsreihen von Aufbereitungstests durchgeführt und die Daten dem Arbeitspakets-Partner zur Verfügung gestellt, damit er den Erfolg der Versuche evaluieren konnte. Weiterhin wurden in den Arbeitspaketen 351 und 352 Modelle zur Aufbereitungsprognose erstellt, optimiert und validiert.

2. Voraussetzung, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

In der Firma Erzlabor gibt es umfangreiche analytische Erfahrung im Bereich der Erze von primären und sekundären Lagerstätten, Geometallurgie, Petrologie, Mineralogie, Mineralchemie sowie Statistik und Modellierung.

Für die Bearbeitung der in den Teilarbeitspaketen beschriebenen Tätigkeiten standen verschiedene Labore und Geräte (insbesondere Mineral Liberation Analyzer, sowie Rasterelektronenmikroskopie, Röntgendiffraktometrie und Röntgenfluoreszenzanalyse) zur Verfügung.

3. Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

Der bewilligte Projektzeitraum erstreckte sich vom 01.10.2022 bis zum 30.09.2025. Die Firma Erzlabor war an zwei Haupt-Arbeitspaketen in verschiedenen Teilarbeitspaketen beteiligt. In AP1 bearbeitete Erzlabor das Teilarbeitspaket 130 (Mineralogische Charakterisierung des Haldenmaterials). Hierbei wurden verschiedene Oberflächen-Proben und eine Tiefenprobe mit verschiedenen Analysemethoden untersucht. Dabei konnte eine gute Übereinstimmung der mineralogischen Zusammensetzung des Haldenmaterials mit Literaturwerten/Altdaten festgestellt werden. Des Weiteren wurde festgestellt, dass sich die Oberflächenproben von der Tiefenprobe hinsichtlich der Zinn-Gehalte unterscheiden, wobei im Oberflächenbereich eine leichte Zinnanreicherung festgestellt wurde, die nicht repräsentativ für den Gesamthaldenkörper ist. Das Teilarbeitspaket wurden wie im Antrag beschrieben durchgeführt. Es ergaben sich durch verspätete Probenahmen der

Projektpartner Zeitverzögerungen, die aber den erfolgreichen Ablauf des Arbeitspaketes nicht behinderten.

In AP3 war Erzlabor für die Bearbeitung der Teilarbeitspakete 320, 321, 340, 351 und 352 verantwortlich. In AP 320 und 321 wurden Aufbereitungsversuchs-Produkte vom Projektpartner UVR-FIA mit mineralogischen (MLA, XRD) und chemischen (XRF) Analysemethoden untersucht. Diese Analysen dienten der Prozess- und Qualitätskontrolle der Versuchsreihen der UVR-FIA. Dabei wurden sowohl die Anreicherungsprodukte als auch Berge/Abfälle der Versuchsreihen analysiert. Die Arbeiten am AP 340 gestalteten sich ähnlich, aber im Gegensatz zu verschiedenen Aufbereitungsversuchen als Grundlage für AP 320 und 321 wurde hierbei eine komplette Versuchsreihe im Pilotmaßstab mit mineralogischen und chemischen Analysen begleitet. Bei den Arbeiten an den Arbeitspaketen 351 und 352 wurden Modelle zur Aufbereitungsprognose erstellt. Als Datengrundlage dienten die mineralogischen Analysedaten aus AP 320. Weitere mineralogischen Analysedaten aus AP 340 dienten dann zur Optimierung und Validierung des Aufbereitungsprognosemodells. Mit dem Aufbereitungsprognosemodell können sowohl vorhandenen Messdaten (z.B. mineralogische Messdaten) kontrolliert als auch Prognosen zum Aufbereitungsverhalten (z.B. Aufschlussgrad von Zinnwaldit im Verhältnis zur Korngröße oder Kornform oder einem bestimmten Verwachsungspartner) erstellt werden. Sowohl die Analysedaten als auch die Ergebnisse der Modellierungen wurden immer direkt mit dem Projektpartner UVR-FIA ausgetauscht und diskutiert. Die Teilarbeitspakete des AP3 wurden wie im Antrag beschrieben durchgeführt. Es ergaben sich wiederum, bedingt durch verspätete Probenahmen und verspätete Versuchsreihen Zeitverzögerungen, die aber den Ablauf des Arbeitspaketes nicht behinderten.

4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Innerhalb der Teilarbeitspakete, die von Erzlabor durchgeführt wurden, erfolgte eine intensive Zusammenarbeit mit den Projektpartnern, insbesondere der UVR-FIA GmbH im Rahmen der versuchsbegleitenden Analysen. Darüber hinaus ergab sich eine Zusammenarbeit mit dem Institut für Glas und Glastechnologie der TU Bergakademie Freiberg, mit dem Erzlabor das reCOmine-Forschungsprojekt „VeharstGlas“ (Fkz 03WIR1921B) durchführt. Für dieses Forschungsprojekt konnte eine größere TEVLIS-Teilprobe für eine VeharstGlas-Versuchsreihe zur Verfügung gestellt werden.



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

TEVLiS: Bewertung der Potenziale der Aufbereitung von verwertbaren Li- Salzverbindungen von Glimmerkonzentraten; TP2: Erzlabor

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil II: Eingehende Darstellung

Ministerium:	Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt
Fördermaßnahme:	Innovation & Strukturwandel
Förderbereich:	WIR! - Wandel durch Innovation in der Region
Projektbündnis:	rECOMine
Förderkennzeichen:	03WIR1912E

Kai Bachmann

Dirk Sandmann

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt unter dem Förderkennzeichen 03WIR1912E gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	1
2. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	9
3. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	11
4. Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	11
5. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	12
6. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	12
7. Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	12
8. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	13
9. Literatur.....	13

Im Folgenden werden die Ergebnisse der durchgeführten Projektarbeiten detailliert dargestellt und diskutiert.

1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Der bewilligte Projektzeitraum des Forschungsvorhabens erstreckte sich vom 01.10.2022 bis zum 31.09.2025. Erzlabor war an zwei von fünf Haupt-Arbeitspaketen (AP1 und AP3) beteiligt. In AP1 bearbeitete Erzlabor das Arbeitspaket AP 130. Dieses Paket umfasste die mineralogische Ausgangs-Charakterisierung des Haldenmaterials der Industriellen Absetzanlage (IAA) Bielatal bei Altenberg. Die Charakterisierung umfasst die Analyse von vier Oberflächen-Proben (Proben B1568, B1569, B1570, B1579) und einer Tiefenprobe (Probe RKS) mit den Analysemethoden Mineral Liberation Analysis (MLA) und Pulver-Röntgendiffraktometrie (XRD). Zusätzlich wurde zu Vergleichszwecken ein Handstück aus der Primär-Lagerstätte Altenberg analysiert.

Von allen erhaltenen Proben zur MLA-Analyse wurden repräsentative Teilmengen abgetrennt und polierte Probenblöcke präpariert. Dabei wurde das Haldenmaterial mit synthetischem Graphit gemischt, um eine bessere und realistischere Partikeltrennung zu erreichen. Das gemischte Material wurde in Epoxidharz eingebettet und die Probenblöcke in Scheiben geschnitten. Diese Scheiben wurden um 90° gedreht und erneut eingebettet, um Effekte der Dichteseperation, die während der Epoxidharzaushärtung eintreten können, zu minimieren. Nach dem Aushärten wurde die Oberfläche der Probenblöcke geschliffen, poliert und mit Kohlenstoff bedampft, um eine elektrisch leitfähige Schicht für die MLA-Analyse zu erzeugen.

Generell konnte eine gute Übereinstimmung der analysierten mineralogischen Zusammensetzung des Haldenmaterials der Bielatalhalde mit Literaturwerten/Altdaten (Weinhold 2022) festgestellt werden. Allerdings wurde auch festgestellt, dass sich die Oberflächenproben von der Tiefenprobe hinsichtlich der Zinn-Gehalte unterscheiden, wobei im Oberflächenbereich eine leichte Zinnanreicherung festgestellt wurde, die nicht repräsentativ für den Gesamthaldenkörper ist. Die Oberflächenproben B1568, B1569, B1570, B1579 wiesen alle einen gegenüber Literaturwerten erhöhten Kassiterit-Gehalt (bis über 0,5 Gew.-%) auf. Die aus tieferen Bereichen der Halde entnommene Probe RKS weist dagegen einen deutlich niedrigeren Kassiterit-Gehalt von 0,2 Gew.-% auf. Somit scheint in den beprobten oberflächennahen Bereichen Kassiterit gegenüber dem Hauptkörper der Halde angereichert zu sein.

Von den Proben B1568, B1569 und B1570 wurden verschiedene Partikelgrößenfraktionen gemessen, die der Projektpartner UVR-FIA hergestellt hatte. Dabei zeigte sich eine Anreicherung von Quarz in den groben Partikelgrößenfraktionen und eine Anreicherung von

Zinnwaldit, anderen Glimmern, Topas, Kaolinit und Hämatit in den feinkörnigen Partikelgrößenfraktionen (Abbildung 1). Auch beim Kassiterit zeigte sich eine Anreicherung in den feinkörnigen Fraktionen. Von mehreren Proben wurden Duplikate bei der Probenpräparation hergestellt. Die Analyse der Duplikate zeigte gute Übereinstimmungen zu den Originalpräparaten. Geringe Unterschiede zeigten sich, wenn bei der Probenpräparation Agglomerat-Bildungen auftraten. Diese Agglomerate konnten aber im weiteren Verlauf des TEVLIS-Vorhabens fast komplett vermieden werden. Beim Vergleich zwischen MLA- und XRD-Analysen zeigten sich gute Übereinstimmungen.

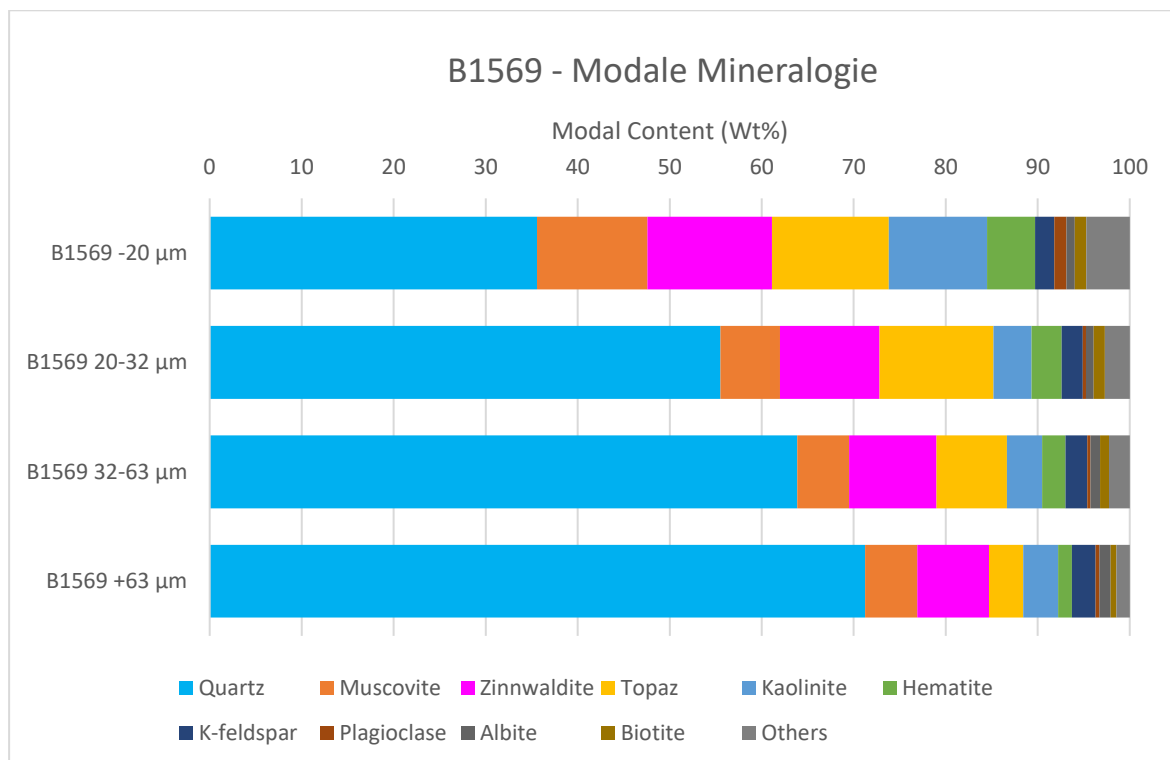


Abbildung 1 Modale Zusammensetzung der vier Partikelgrößenfraktionen der Oberflächenprobe B1569. Die Analyse wurde mittels MLA durchgeführt.

Neben den Haupt- und Nebenmineralen konnten mittels MLA-Analyse eine Vielzahl von Spurenmineralen festgestellt werden. Insgesamt umfasst die Mineralreferenzliste 98 Einträge. Der Hauptteil davon sind allerdings Spurenminerale, die nur in sehr geringen Mengen gefunden wurde wie z.B. drei Partikel des Calciumwolframats Scheelit in der Probe RKS. Zur Veranschaulichung des Mengenverhältnisses; in der gleichen Probe wurden z.B. 27367 Partikel detektiert, die das Mineral Quarz enthalten.

Bei den MLA-Analysen wurde festgestellt, dass sich das Schadelement Arsen in einigen Oberflächenproben in Arsenaten angereicht hat, in den meisten Proben aber noch in Form von Arsensulfiden (Arsenopyrit und Enargit) und Arseniden (Löllingit) auftritt. In der Probe

RKS sind ca. 42 % des vorhandenen Arsengehaltes an Sulfide gebunden, 54 % an Arsenate und 4 % an Phosphate.

In AP3 bearbeitete Erzlabor die Teilarbeitspakete 320, 321, 340, 351 und 352. In AP 320 und 321 wurden die Produkte der verschiedenen Aufbereitungsversuche vom Projektpartner UVR-FIA mit mineralogischen (MLA, XRD) und chemischen (Röntgenfluoreszenz XRF) Analysemethoden untersucht. Für die Analysen, die der Prozess- und Qualitätskontrolle dienen, wurden sowohl die Anreicherungsprodukte/Konzentrate der Aufbereitungsversuche (z.B. Magnetprodukt 1, Magnetprodukt 2, Flotationsprodukt, ...) als auch die Abfälle/Berge genutzt.

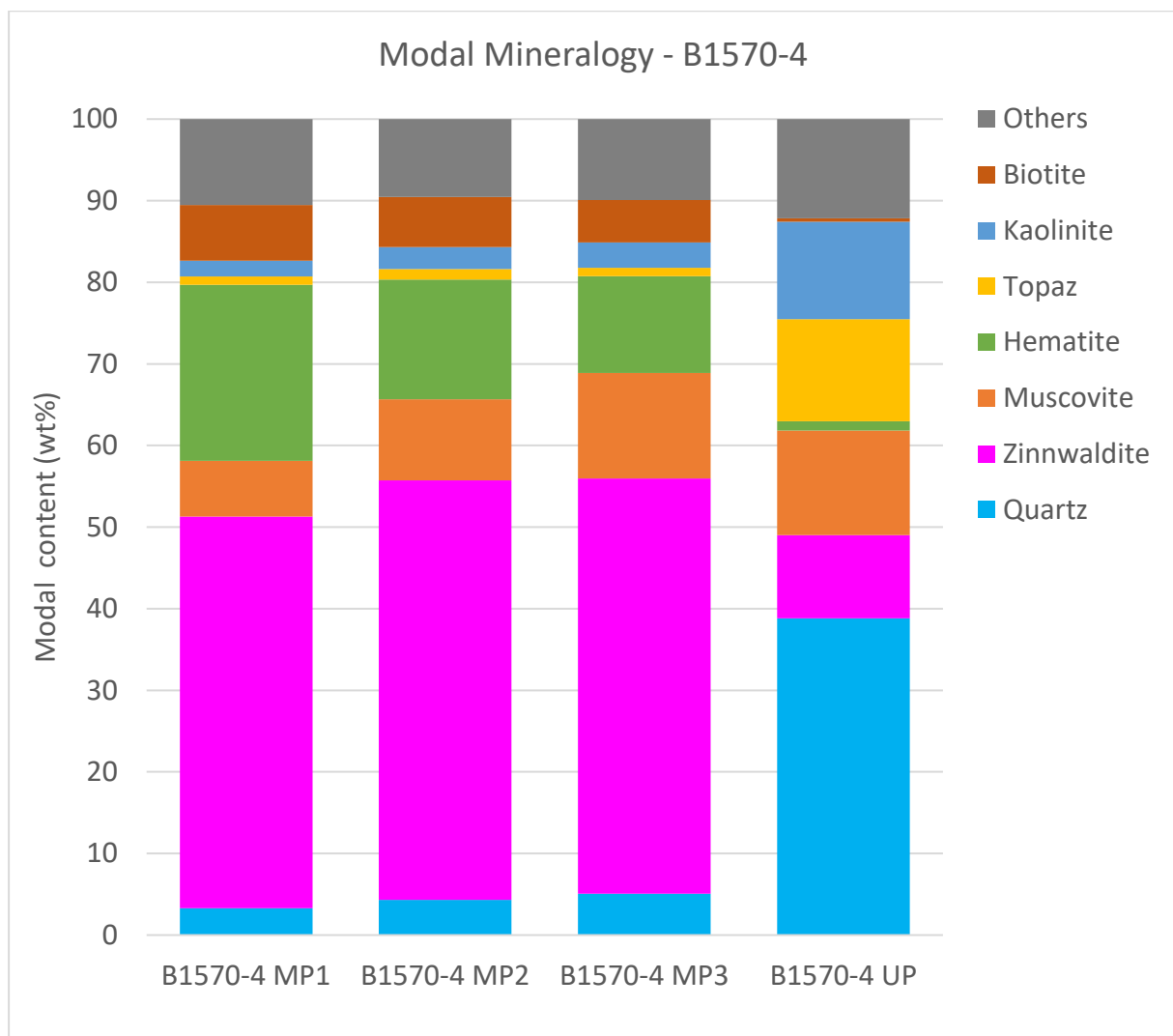


Abbildung 1 Mineralogische Zusammensetzung der Produkte eines Magnetscheideversuches an der Oberflächen-Teilprobe B1570-4 (Produkte: Magnetprodukt 1, Magnetprodukt 2, Magnetprodukt 3, unmagnetisches Produkt).

Die verschiedenen Aufbereitungstest-Methoden wie Magnetscheidung, Flotation, Hydrozyklon, und andere, zeigten dabei unterschiedliche Stärken und Schwächen in der Anreicherung bestimmter Minerale. So wird z.B. bei der Magnetscheidung eine deutliche Anreicherung des Zinnwaldits in den Magnetprodukten erreicht, dort aber auch andere Minerale wie Hämatit und weitere Glimmer (z.B. Biotit) angereichert (Abbildung 2). Genauere Erläuterungen zu den Ergebnissen der verschiedenen Aufbereitungsversuche sind den Berichten des Projektpartners UVR-FIA zu entnehmen.

Bei den Vergleichen der Analyse-Methoden MLA, XRD und XRF zeigten sich zum Teil gute Übereinstimmungen untereinander, aber auch gewisse technik-bedingte Unterschiede. So zeigten z.T. initiale XRD-Analysen deutliche Unterschiede zur MLA-Analyse, was durch den hohen Glimmeranteil des Probenmaterials bedingt war. Dieser hohe Glimmeranteil bedingte eine bestimmte Präparationsmethode (Einsiebung des Probenmaterials) zur XRD-Probenvorbereitung. Nach Anwendung dieser angepassten Vorbereitungsmethode und erneuter XRD-Analyse konnte eine deutlich bessere Übereinstimmung der XRD-Ergebnisse mit den MLA-Ergebnissen festgestellt werden.

Die Arbeiten am AP 340 gestalteten sich ähnlich, aber im Gegensatz zu den einzelnen Aufbereitungstestversuchen als Grundlage für AP 320 und 321 wurde hierbei eine komplette Versuchsreihe im Pilotmaßstab mit mineralogischen und chemischen Analysen begleitet. Für diese Versuchsreihe wurde das Probenmaterial der Tiefenprobe RKS genutzt. Aus dieser Versuchsreihe wurden verschiedene Produkte mittels MLA-, XRD- und XRF-Analytik untersucht. Abbildung 3 zeigt die verschiedenen analysierten Produkte und ihre Herkunft im Prozessschema. Die genauen Versuchsschritte und die Beurteilung der Güte der einzelnen Versuchsabschnitte ist den Berichten des Vorhabens-Partners UVR-FIA zu entnehmen. Die gewonnenen Datensätze der MLA-Analysen wurden als Grundlage für nachfolgende Modellierungen genutzt.

Im Pilotversuch wurden von der UVR-FIA die zwei Versuchsmethoden Magnetscheidung und Flotation durchgeführt. Alle Magnetscheideversuche waren auf das Wertmineral Zinnwaldit gerichtet, ebenso die Flowsheet F3 Flotation. Im Gegensatz dazu waren die Flotationsversuche F1 und F2 auf eine Kassiterit-Anreicherung ausgerichtet. Exemplarisch für die Zinnwaldit-Anreicherungsversuche sollen hier zunächst die Ergebnisse der F3-Flotation und F3-Magnetscheidung vorgestellt werden (Abbildung 4).

Die Flowsheet F3 Flotationsprodukte Ro1, Ro2 und Ro3 zeigen eine moderate Anreicherung des Zinnwaldits gegenüber den Flotationsbergen. Die darauffolgenden Magnetscheideprodukte MP-1, MP-2 und MP-3 zeigen eine starke Anreicherung des Zinnwaldits gegenüber dem unmagnetischen Produkt UP.

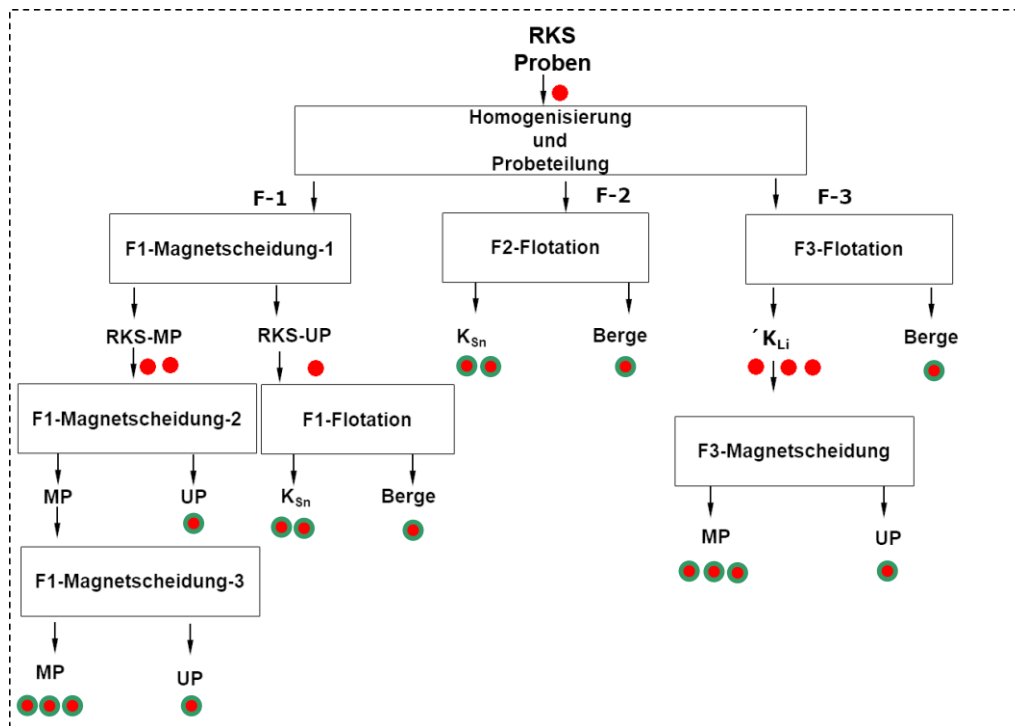


Abbildung 2 Prozessschema des Pilotversuches an der Probe RKS mit den drei Flowsheets F1, F2, F3 und Kennzeichnung der Probenentnahmen (je roter Punkt eine Teilprobe) für MLA, XRD und XRF-Analysen. Grüner Kreis: MLA-Messdaten für Modellierung genutzt

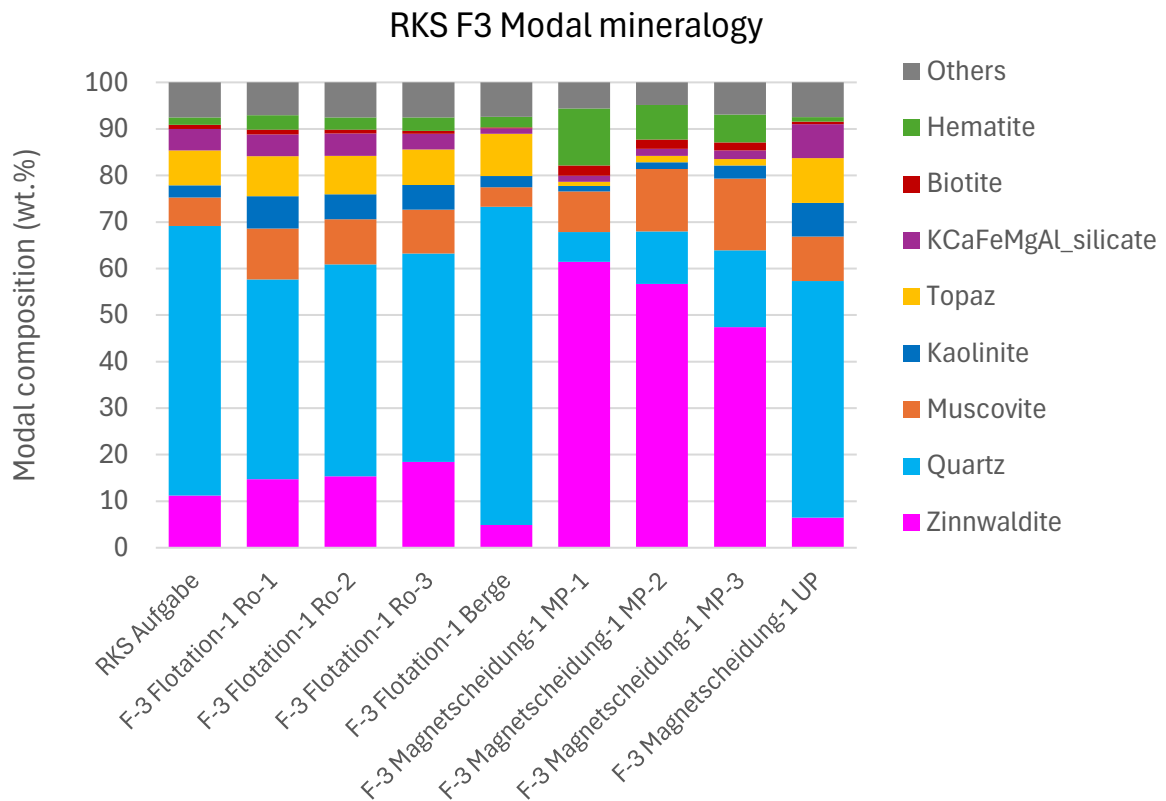


Abbildung 4 Darstellung der mittels MLA bestimmten mineralogischen Zusammensetzung der Ausgangsprobe RKS und der Produkte der Flotations- und Magnetscheideversuche F3

Bei der Kassiterit-Flotation F2 zeigt sich eine Verdopplung des Kassiterit-Gehaltes in der Probe Ro-1 gegenüber der Ausgangsprobe RKS-Aufgabe. Gleichzeitig führte der Versuch auch zu einer Anreicherung des Minerals Topaz (Abbildung 5).

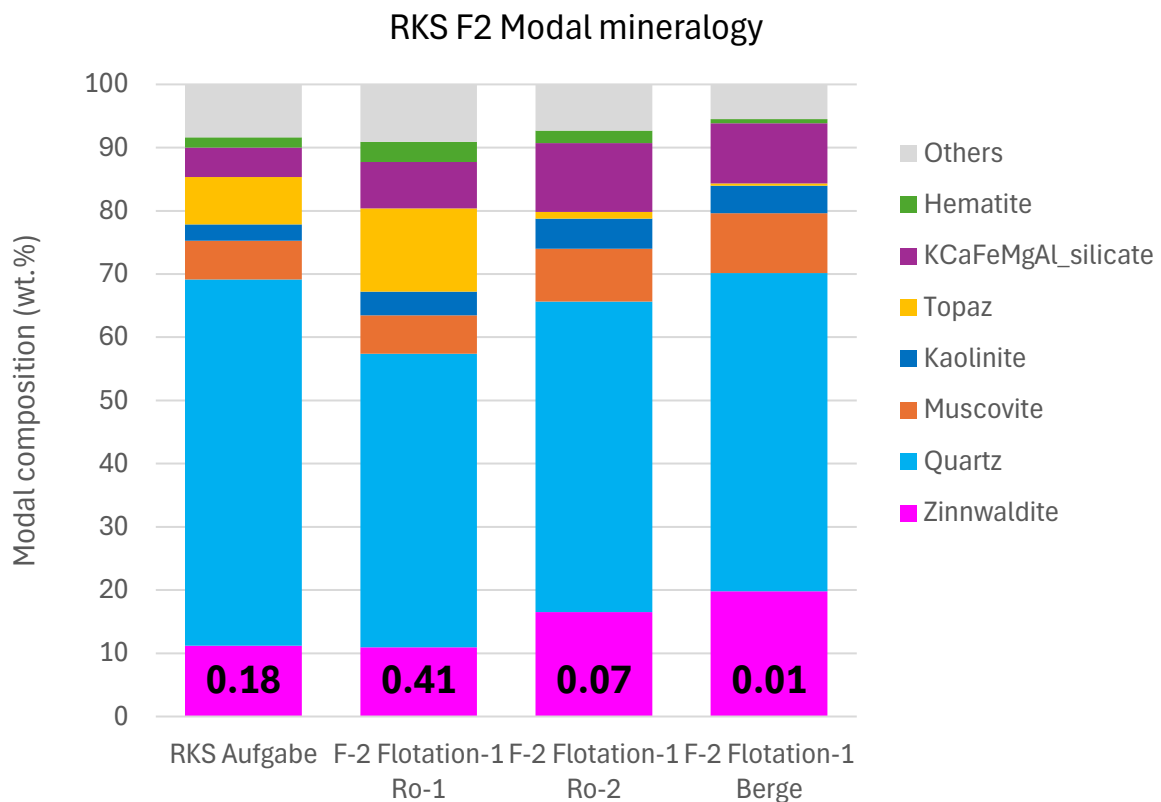


Abbildung 5 Darstellung der mineralogischen Zusammensetzung (mit MLA bestimmt) der Ausgangsprobe RKS und der Produkte des Flotationsversuches F2. Die fett gedruckten Zahlen zeigen den ermittelten Kassiterit-Gehalt der Proben in Gewichtsprozent.

Bei den Arbeiten an den Arbeitspaketen 351 und 352 wurden Partikel-basierten Trennmodelle zur Aufbereitungsprognose erstellt. Als Datengrundlage dienten die mineralogischen Analysedaten aus AP 320. Weitere mineralogischen Analysedaten aus AP 340 dienten dann zur Optimierung und Validierung des Aufbereitungsprognosemodells.

Die Partikel-basierten Trennmodelle (Particle-Based Separation Models, PSMs) sind ein computergestützter Ansatz zur Simulation von Aufbereitungsprozessen auf Ebene einzelner Partikel. Im Gegensatz zu herkömmlichen Methoden, die nur durchschnittliche Eigenschaften betrachten, behandeln PSM jedes Partikel individuell.

Eingabeparameter für jedes Partikel sind:

- Modaler Gehalt: Das Gewicht jedes Minerals innerhalb eines Partikels
- Oberflächenexposition: Die Fläche jedes Minerals an der Partikeloberfläche
- Äquivalenter Kreisdurchmesser (ECD): Die Größe eines Partikels
- Aspektverhältnis: Ein Maß für das Seitenverhältnis eines Partikels

Modellansatz: Ein lasso-regularisiertes logistisches Regressionsmodell wird mit den Proben jeder Flowsheet-Konfiguration trainiert. Das Modell bewertet die Bedeutung jeder Partikeleigenschaft für die Wahrscheinlichkeit der Ausbeute und eliminiert irrelevante oder korrelierte Variablen, um Überanpassung zu vermeiden (Pereira et al. 2021).

Datengrundlage der Modellierung:

- Produkte aller Flowsheets, die vom Partner UVR-FIA im TEVLiS-Projekt erstellt und von Erzlabor mit MLA (Mineral Liberation Analyzer) analysiert wurden
- Daten wurden im mdb-Datei-Format exportiert und in die Simulationsplattform des Helmholtz-Instituts Freiberg für Ressourcentechnologie importiert

Anwendung der Modellierung auf drei Flowsheets (Siehe Abbildung 3, rote Punkte mit grünem Rand):

- F1: 8 Produkte (Flotation und magnetische Separation in mehreren Stufen)
- F2: 3 Produkte (Kassiterit Flotation)
- F3: 5 Produkte (kombinierte Flotation und magnetische Separation)

Die drei Flowsheets wurden hinsichtlich ihrer Trenneffizienz für die beiden Zielminerale Zinnwaldite (Li-Quelle; Abbildung 6) und Kassiterit (Sn-Quelle; Abbildung 7) verglichen.

Wichtigste Trends:

- Zinnwaldit
 - Seine Gehalte im Konzentrat erreichten bis zu 60 % in den magnetischen Produkten der Flowsheets 1 und 3, den besten Optionen für die Gewinnung dieses lithiumhaltigen Glimmers.
 - Die Verluste an Zinnwaldit im nichtmagnetischen Produkt des Flowsheets 1 lassen sich auf die geringe Rückgewinnung feiner Partikel (<30 µm) in diesem Verfahren zurückführen.
 - Das wichtigste Gangmineral, das ebenfalls im magnetischen Produkt 1 des Flowsheets 1 zurückgewonnen wird, ist Hämatit. Eine Lösung zur Trennung von Zinnwaldit und Hämatit wäre erforderlich, um dieses Li-reiche Produkt weiter zu reinigen.

- Gleiche Ausbeuteverläufe für Zinnwaldit konnten im Flowsheet 3 beobachtet werden. Der Gehalt an Zinnwaldit im nichtmagnetischen Produkt dieses Fließschemas ist jedoch deutlich geringer, was die insgesamt beste Li-Ausbeute in diesem Fließschema bestätigt. Zur weiteren Anreicherung des Konzentrats sollte die künftige Abtrennung von Hämatit aus den magnetischen Produkten untersucht werden.

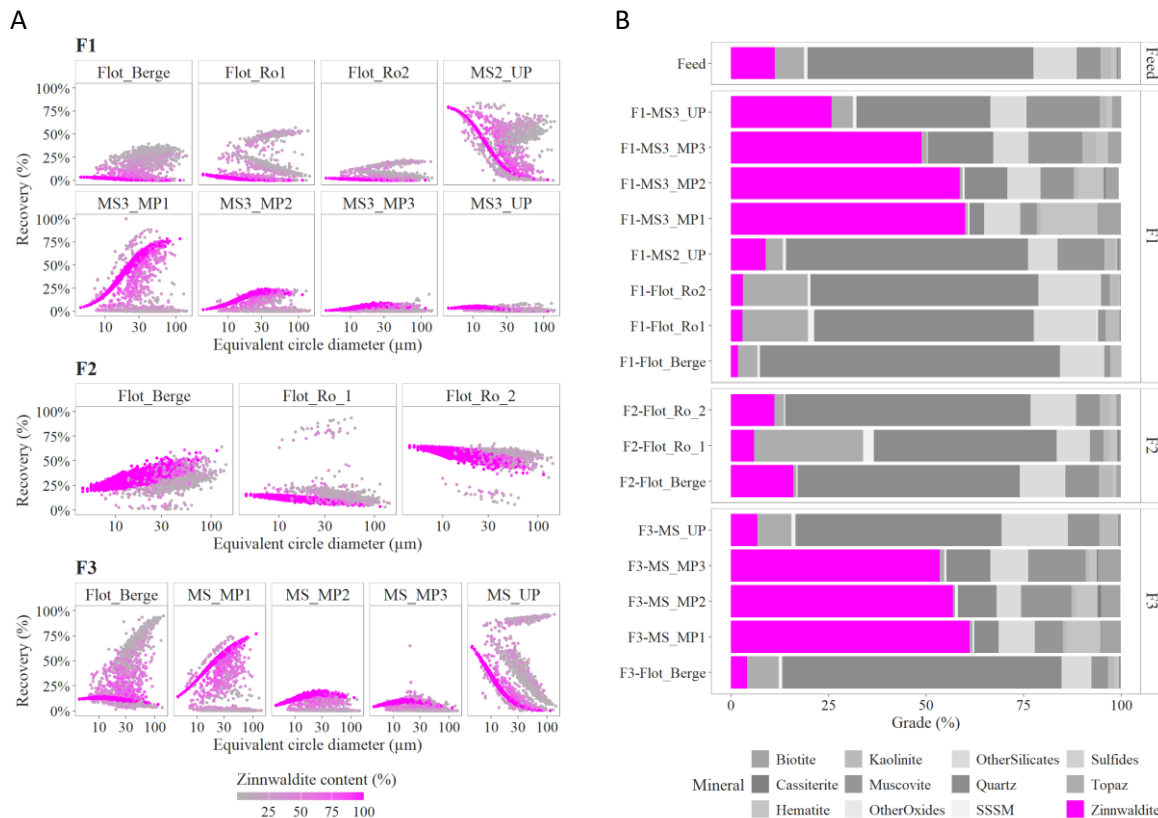


Abbildung 6: (A) Ausbeute (Recovery) an Partikeln, die Zinnwaldit enthalten, in den verschiedenen Produkten jedes Verfahrensablaufs in Abhängigkeit von ihrer Größe (Equivalent circle diameter) und ihrem Kassiteritgehalt (Zinnwaldite content). (B) Modale Mineralogie jedes Produkts in den drei Flowsheets, wobei der Zinnwaldit-Gehalt (pink) hervorgehoben ist.

• Kassiterit

- Angesichts des geringen Kassiteritgehalts der Aufgabeproben erreichten die Gehalte dieses Minerals in den Konzentraten kaum 1 %, was die Schwierigkeiten bei der Anreicherung von Kassiterit aus diesem Material verdeutlicht.
- Die besten Ausbeuten an Kassiterit wurden im Rougher-1 (Ro1)-Flotationskonzentrat des Flowsheets 2 beobachtet.
- Die Ausbeuteverläufe der Kassiteritpartikel im Rougher-2 (Ro2)-Produkt des Flowsheets 2 deuten auf eine Ausbeute durch *Entrainment* (ungewolltes mechanische Mitreißen von feinen Partikeln durch das Fluid, das zwischen den Luftblasen im Schaum nach oben transportiert wird) hin. Möglicherweise findet die gesamte Ausbeute durch *True-Flotation* bereits im ersten Konzentrat dieses Prozesses statt.

- In den anderen Flowsheets war die Kassiterit-Ausbeute in den Abgängen der jeweiligen Prozesse höher, was darauf hindeutet, dass diese Anreicherung nicht selektiv ist und die verwendeten Verfahren nicht auf dieses Mineral ausgerichtet waren.

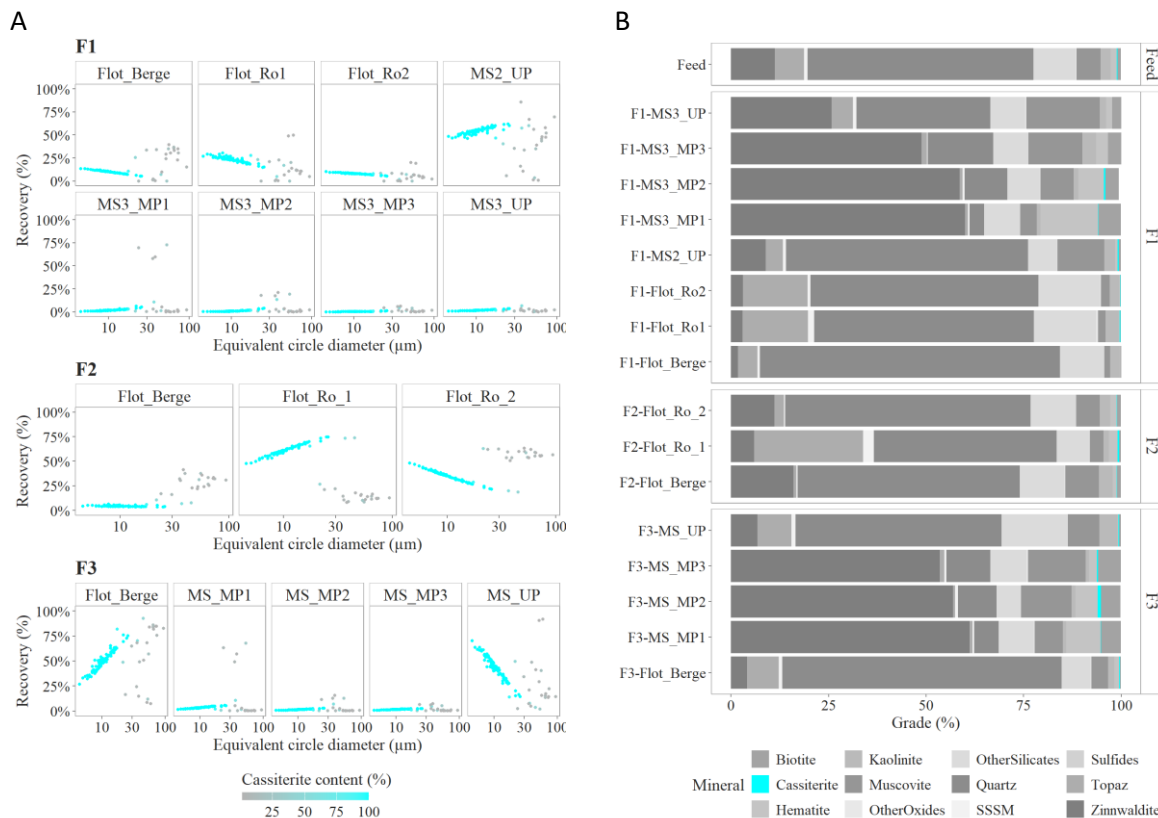


Abbildung 7: (A) Die Ausbeute (Recovery) an Partikeln, die Kassiterit enthalten, in den verschiedenen Produkten jedes Verfahrensablaufs in Abhängigkeit von ihrer Größe (Equivalent circle diameter) und ihrem Kassiteritgehalt (Cassiterite content)). (B) Modale Mineralogie jedes Produkts in den drei Flowsheets, wobei der Kassiterit-Gehalt (Cyan) hervorgehoben ist.

Sowohl die Analysedaten als auch die Ergebnisse der Modellierungen wurden stets direkt nach den Messungen und Modellierungen mit dem Projektpartner UVR-FIA ausgetauscht und diskutiert. Alle Teilarbeitspakete des AP3 wurden wie im Antrag beschrieben durchgeführt. Es ergaben sich wiederum wie im AP1, bedingt durch verspätete Probenahmen und verspätete Versuchsreihen Zeitverzögerungen, die aber den Ablauf des Arbeitspaketes nicht behinderten.

2. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die Entwicklung von Modellen zur Simulation und Vorhersage von Mineralaufbereitungsprozessen ist ein hochrelevantes Forschungs- und Anwendungsgebiet

für die Bergbauindustrie. Der Einsatz solcher Modelle ermöglicht die Steigerung der Effizienz der Aufbereitung in den Bergbaubetrieben sowie die Prognose der Aufbereitungsergebnisse von Erzen, noch bevor entsprechende Betriebsanlagen errichtet werden.

Die ursprünglichen prädiktiven Mineralverarbeitungsmodelle basierten lediglich auf empirischen Daten. Infolge der signifikanten Fortschritte in der Rechenleistung von Computern und Servern erfolgte eine Entwicklung der Modellgrundlagen in Richtung einer phänomenologischen Beschreibung von Prozessen (King 2001). Derzeit wird in der Forschung anerkannt, dass die Resultate des Prozesses von den Eigenschaften einzelner Partikel abhängen (King 2001). Aufgrund von Recheneinschränkungen müssen die Partikel unter Verwendung von Verteilungsfunktionen ihrer Eigenschaften dargestellt werden (King 2001). Zu diesen Eigenschaften zählen beispielsweise die Partikelgröße, die modale Mineralogie und die Mineral-Freisetzung.

Die Implementierung von Mineralpartikeleigenschaften in Aufbereitungsmodelle wurde durch Fortschritte in der Charakterisierungstechnik von Erzen motiviert (Lotter 2011). Ein Beispiel hierfür sind automatisierte Mineralidentifizierungssysteme, die auf der Basis von optischen oder Rasterelektronenmikroskopen entwickelt wurden (Fandrich et al. 2007). Die Entwicklung automatisierter Mineralogiesysteme (AMS) auf der Basis von Rasterelektronenmikroskopen, wie sie etwa der Mineral Liberation Analyzer (MLA) oder die TIMA-X repräsentieren, markierte einen entscheidenden Fortschritt für die moderne Prozessmineralogie (vgl. Lotter 2011). Dabei lag der entscheidende Vorteil zur effizienten Charakterisierung von Rohstoffproben in der Kombination der Erfassung von Rückstreuerelektronenbildern (Bildverarbeitung) und der Akquisition von energiedispersiven Spektren (Elementanalyse).

Zu den detaillierten Charakterisierungsdaten, die die AMS-Technologie bereitstellt, zählen quantitative Daten zur modalen Mineralogie, der Oberflächenzusammensetzung, der Mineralfreisetzung sowie unterschiedlichen Größen- und Formparameter einzelner Partikel und Mineralkörner in einer Probe. Auf Grundlage der vorliegenden Daten können weitere signifikante Eigenschaften, wie beispielsweise die Partikeldichten und die chemischen Zusammensetzungen, kalkuliert werden (vgl. Fandrich et al. 2007). Gegenwärtig wird die vollumfängliche Anwendung der Daten durch die Beschränkung der Dateneingabe in die tatsächlichen Prozessvorhersagemethoden behindert. Daher nutzen Forscher sowie die Bergbauindustrie gegenwärtig lediglich die durchschnittliche Probenzusammensetzung, die auf Partikelinformationen (beispielsweise modale Probenmineralogie oder Mineralfreisetzung) basiert, für prädiktive geometallurgische Modelle oder für den Entwurf neuer Verarbeitungsanlagen (vgl. Adams 2007; Alruiz et al. 2009; Bulled und McInnes 2005; Lotter 2011; Rincon et al. 2019).

Lamberg und Viana (2007) führten einen alternativen Ansatz zur Prozessvorhersage ein, um die in AMS-Datensätzen enthaltenen Mineralfreisetzungsdaten weiter nutzen zu können. Dieser Ansatz basiert auf der Partikelverfolgung (Particle Tracking). Im weiteren Verlauf wurden diese Ansätze der Partikelverfolgung durch Hannula et al. (2018) und Schach et al. (2019) weiterentwickelt. Die von den genannten Autoren präsentierten Methoden bedürfen einer Vielzahl an Benutzerinteraktionen, die potenziell zu menschlicher Voreingenommenheit (human bias) führen können.

Eine benutzerunabhängige Methodik, die mit dem vollständigen Datensatz arbeitet, also ohne Partikelbinning bzw. -gruppierung, ist der Schlüssel zur Verbesserung der Partikelverfolgungsmethoden. Dies ist insbesondere deshalb von Relevanz, da eine Variablenauswahl in diesem Kontext als nicht zielführend erachtet wird. Der vorliegende Sachverhalt weist darauf hin, dass der Einfluss menschlicher Voreingenommenheit durch derartige Eigenschaften reduziert wird. Zudem wird eine vollständige Datenauflösung genutzt, um präzisere Ergebnisse zu erzielen. Durch die kontinuierliche Optimierung statistischer und maschineller Lernmethoden stehen derzeit Techniken zur Verfügung, die eine Automatisierung dieses Prozesses ermöglichen. Die vorliegenden Techniken vermögen es, den Einfluss spezifischer Parameter auf den Prozess darzustellen und zu kombinieren, was von Menschen in dieser Form nicht antizipiert worden wäre.

3. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Innerhalb der Teilarbeitspakete, die von Erzlabor durchgeführt wurden, kam es zu intensiver Zusammenarbeit mit den Projektpartnern vor allem mit dem Partner UVR-FIA. Darüber hinaus ergab sich eine Zusammenarbeit mit dem Institut für Glas und Glastechnologie der TU Bergakademie Freiberg, mit dem Erzlabor das reCOmine-Forschungsprojekt „VeharstGlas“ (Fkz 03WIR1921B) durchführt. Für dieses Forschungsprojekt konnte eine TEVLIS-Teilprobe für eine VeharstGlas-Versuchsreihe zur Verfügung gestellt werden.

4. Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Gemäß dem abschließenden zahlenmäßigen Nachweis wurden die Mittel wie geplant verwendet. Dabei ergaben keine Änderungen gegenüber der ursprünglichen Planung bei den Kosten für die sonstigen unmittelbaren Vorhabenkosten (Analysekosten). Reisemittel wurden nicht benötigt und entsprechend §2.1.1 der Nebenbestimmungen (<20 % Abweichung Kosteneinzelansätze) für die Abdeckung von Personalkosten genutzt. Aus diversen Gründen fielen die Personalkosten höher aus als in der Gesamt-Vorkalkulation berechnet. Der Anteil des Eigenanteils der Selbstkosten von Erzlabor hat sich dadurch erhöht

und wurde durch Eigenmittel der Firma abgedeckt. Es entstand keine zusätzliche Forderung bezüglich der Projektfördersumme.

5. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die mineralogische und chemische Materialcharakterisierung des Materials aus der Bielatalhalde war wichtig, um eine Bestätigung der spärlichen Literaturdaten zur Modalzusammensetzung des Haldenmaterials sowie Daten zur Planung der ersten Aufbereitungsversuche zu erhalten. Mithilfe der versuchsbegleitenden Analysen und Modellierungen konnten der Vorhabens-Partner UVR-FIA eine ständige Qualitätskontrolle der Versuche vornehmen und Aufbereitungs-Prozessparameter anpassen, um so die Effizienz der Wertstoffabtrennung bei den Versuchen zu steigern. Bei der Auswahl der Analyseproben wurde auf eine sinnvolle Kombination von Probenumfang und Aussagekraft für die Versuchsreihen der UVR-FIA geachtet. Ein Teil des Probenmaterials des TEVLIS-Vorhabens konnte dem reCOmine-Projekt VeharstGlas übergeben und dort zur Test-Herstellung von Glasfasern weitergenutzt werden.

6. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die Ergebnisse des Vorhabens können genutzt werden, um ähnliche Haldenkörper hinsichtlich ihrer Wertminerale zu beurteilen, zu vergleichen und Schlüsse für die potenzielle Aufbereitung oder Aufbereitungsversuche zu ziehen. Auch in zukünftigen geometallurgischen Projekten von primären und sekundären Lagerstätten können die Ergebnisse für Vergleiche, Prognosen und Entscheidungsfindungen (z.B. Methodenauswahl zu Aufbereitung) genutzt werden. Das im Vorhaben erstellte Modellierungskonzept von Erzlabor kann ebenfalls auf weitere ähnliche Haldenarten angewendet werden. Die gewonnenen Daten des TEVLIS-Vorhabens können auf nationalen und internationalen Konferenzen vorgestellt werden.

7. Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit erlangten die Bearbeiter der von Erzlabor durchgeführten Teilarbeitspakete keine Kenntnisse von anderen Vorhaben ähnlicher Fragestellung bei anderen Stellen.

8. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Zurzeit sind keine Veröffentlichungen unserer Ergebnisse erfolgt oder geplant.

9. Literatur

- Adams MD (2007). Towards a virtual metallurgical plant 2: Application of mineralogical data. *Miner. Eng.* 20:472–479.
- Alruiz OM, Morrell S, Suazo CJ, Naranjo A (2009). A novel approach to the geometallurgical modelling of the Collahuasi grinding circuit. *Miner. Eng.* 22:1060–1067.
- Bulled D, McInnes C (2005). Flotation Plant Design and Production Planning Through Geometallurgical Modelling. *Centen. Flotat. Symp.*: 809–814.
- Fandrich R, Gu Y, Burrows D, Moeller K (2007). Modern SEM-based mineral liberation analysis. *Int. J. Miner. Process.* 84:310–320.
- Hannula J, Kern M, Luukkanen S, Roine A, van den Boogaart KG, Reuter M (2018). Property-based modelling and simulation of mechanical separation processes using dynamic binning and neural networks. *Miner. Eng.* 126:52–63.
- King RP (2001). Modeling and simulation of mineral processing systems, Butterworth-Heinemann. Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/B978-0-08-051184-9.50010-9>
- Lamberg P, Vianna S, (2007). A technique for tracking multiphase mineral particles in flotation circuits. *XXII Encontro Nac. Trat. Minérios e Metal. Extrativa - VII Meet. South. Hemisph. Miner. Technol.*:195–202.
- Lotter NO (2011). Modern process mineralogy: an integrated multi-disciplined approach to flowsheeting. *Miner. Eng.* 24:1229–1237.
- Pereira L, Frenzel M, Khodadadzadeh M, Tolosana-Delgado R, Gutzmer J (2021). A self-adaptive particle-tracking method for minerals processing, *Journal of Cleaner Production*, Volume 279, 123711, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123711>.
- Rincon J, Gaydardzhiev S, Stamenov L (2019). Investigation on the flotation recovery of copper sulphosalts through an integrated mineralogical approach. *Miner. Eng.* 130:36–47.
- Schach E, Buchmann M, Tolosana-Delgado R, Leißner T, Kern M, Gerald van den Boogaart K, Rudolph M, Peuker U (2019). Multidimensional characterization of separation processes – Part 1: Introducing kernel methods and entropy in the context of mineral processing using SEM-based image analysis. *Miner. Eng.* 137:78–86.
- Weinhold G (2002) *Bergbau in Sachsen, Band 9, Die Zinnerz-Lagerstätte Altenberg/Osterzgebirge*